边界层参数化方案对一次西北地区沙尘天气过程影响的数值模拟研究

魏 倩[1]， 隆 霄[1]， 赵建华[2]， 韩子霏[1]， 王思懿[1]
（1. 兰州大学大气科学学院，甘肃 兰州 730000；2. 中国气象局兰州干旱气象研究所，甘肃 兰州 730020）

摘 要： 使用耦合化学模块的高分辨率中尺度数值模式WRF-Chem3.4，结合近地层观测资料评估YSU、MYJ、QNSE、MYNN2.5和BouLac共5种边界层参数化方案对2007年3月27日西北地区一次沙尘天气过程模拟效果的影响，结果显示5种边界层参数化方案均可模拟出此次沙尘天气的发展演变过程，其中YSU和BouLac方案模拟出相对较高的地表摩擦速度、10 m风速、2 m温度和地面PM_{10}浓度以及相对较低的2 m相对湿度，从而模拟的地表沙尘天气过程较强，MYJ、QNSE和MYNN2.5方案模拟的地表沙尘天气则相对较弱，这表明不同边界层参数化方案通过摩擦速度的不同模拟效果对沙尘排放通量和PM_{10}浓度的模拟有重要影响，较大的摩擦速度会使起沙参数化方案计算的沙尘排放通量和PM_{10}浓度更高，加之午后近地层的强风、高温和低湿特征对沙尘天气的增强作用，使得BouLac方案模拟的沙尘天气最强，而QNSE方案的模拟结果最弱；利用民勤站观测资料对5种边界层参数化方案模拟结果的统计分析表明，不同方案对民勤站沙尘暴前后有关气象要素的模拟效果存在一定的差异，其中QNSE方案对PM_{10}浓度的模拟效果最好，BouLac方案对10 m风速的模拟效果最好，YSU方案对2 m温度和2 m相对湿度的模拟效果最好，整体而言，YSU方案对民勤站近地层气象要素的模拟有一定的优势，QNSE方案的模拟结果相对最差。

关键词： WRF-Chem；沙尘；边界层参数化；数值模拟

大气边界层（Planetary Boundary Layer, PBL）是指直接受地表摩擦、热力和蒸发过程显著影响的大气层，高度可达数公里[1]。作为自由大气和地表之间的缓冲地带，边界层内由于湍流运动引起的动量、热量和水汽交换对天气和气候有重要影响。

由于利用数学方法描述湍流输送过程存在明显的困难，在数值模式中通常以参数化的形式来描述边界层中有关动力及热力结构的特征变化。不同的边界层参数化方案因其闭合方法、闭合阶数等方面的差异，其数值模拟效果也存在一定差异。相关研究指出，与局地方案相比，非局地方案通常具有更好的模拟效果[2]，能够模拟出更强的湍流混合作用和更为深厚的对流边界层[3-6]，其中ACM2（Asymmetric Convective Model Version 2）方案是模拟干旱地区大气边界层结构和近地层气象要素的较优选择[7-9]，可为空气质量模式提供合理的气象场[10]，从而更好地模拟污染物浓度[11]，但考虑到其他因素如陆面过程参数化、地形和模式分辨率等综合影响，局地方案在模拟近地层气象要素时也有一定的优势，例如MYNN2.5（Mellor-Yamada-Nakanisfii and Niino 2.5）方案能够较好的模拟恒河流域一次干旱过程[12]。此外，已有研究表明边界层参数化方案的适用性因地区差异、天气过程类型不同存在明显差异。已有学者聚焦局地复杂天气过程如台风、暴雨、平流雾和龙卷风等，探寻其对不同天气过程的影响。这些研究指出：ACM2方案和MYJ（Mellor-Yamada-Janjic）方案对台风过程的模拟有一定的优势[13-15]；YSU（Yonsei University）方案对平流雾过程中风速的模拟效果最佳，QNSE（Quasi-Normal Scale Elimination）方案对平流雾生成的时间地点预报较准[16]；非局地方案低估了热力相关的变量，局地方案可模拟出较强的浮力，因而适合龙卷风过程的预测[17]；YSU方案适用于四川盆地较大量级降水的模拟[18]。另有研究表明，同一参数化方案对不同气象

收稿日期： 2020-04-27； **修订日期：** 2020-05-24
基金项目： 中国沙漠气象科学研究基金项目（Sqj2016003）；国家自然科学基金项目（41375019，41375033）
作者简介： 魏倩（1994-），女，硕士研究生，主要从事大气动力学和中尺度数值天气预报研究. E-mail: weiq17@lzu.edu.cn
通讯作者： 隆霄. E-mail: longxiao@lzu.edu.cn

要素的模拟效果也存在差异[19-20]。以上研究的开展对区域数值天气预报准确性的提高有重要意义。

沙尘天气主要发生在春季影响我国西北地区的一种严重气象灾害，是大风与下垫面相互作用的产物。西北地区沙漠广布，可为此类天气的形成提供充足的沙源，春季大气环流调整阶段频繁南下的冷空气和西北地区复杂地形的作用，尤其是河西走廊的狭管效应，有利于大风的形成和起沙过程的发展；此外，午后形成的近地层不稳定层结能为沙尘暴的形成提供有利的不稳定机制。有关沙尘天气的数值模拟研究常聚焦于数值模式中起沙参数化方案对起沙过程的合理描述，近地层大气状态、土壤性质和地表植被等因素均会影响起沙通量的模拟效果[21]。但起沙过程主要发生在边界层，伴随着风速、温湿度、沙尘浓度等要素的显著变化，是一种具有非线性、多尺度、随机性的复杂湍流输运过程[22]，此外，边界层湍流相干结构也与泥沙起动与输送密切相关[23]。总而言之，不同边界层参数化方案对湍流作用的模拟差异，会导致起沙通量的模拟效果产生差异，因此边界层参数化方案的合理选取对于沙尘天气发展过程中沙尘浓度的模式预报有重要影响。考虑到沙尘天气的模拟与边界层过程的准确模拟密切相关，本文针对一次西北地区沙尘天气过程，主要分析WRF（Weather Research and Forecasting Model）模式中有关边界层参数化等对近地层气象要素以及PM_{10}浓度模拟效果的影响。

1 试验设计和参数化方案简介

1.1 模式设置及试验设计

选择2007年3月27日西北地区一次沙尘天气过程为研究对象，利用耦合了化学模块的高分辨率中尺度数值模式WRF-Chem3.4（Weather Research and Forecasting Model with Chemistry）版本开展数值模拟，重点关注非局地闭合的YSU及局地闭合的MYJ、QNSE、MYNN2.5和BouLac共5种边界层参数化方案对沙尘天气过程中起沙效果的影响。试验模拟区域中心点设在民勤站（103.08°E，38.63°N），采用三重双向嵌套网格（D01，D02，D03），模拟区域及D03地形如图1所示。初始场和边界条件采用美国气象环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction，NCEP）和美国国家大气研究中心（National Center for Atmospheric Research，NCAR）联合制作的每6 h一次的1°×1°FNL（Final）客观分析资料及NCEP全球地形资料。具体的模式设置及试验设计在表1中给出。化学模块的积分步长为10 min，化学方案选取仅考虑沙尘的GOCART（Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport）气溶胶方案，并选取GOCART-AFWA（GOCART with Air Force Weather Agency）方案作为起沙参数化方案，同时仅考虑干沉降过程，暂不考虑湿沉降、光化学过程、生物气溶胶、海盐气溶胶、湿清除及气溶胶对辐射的反馈等过程。模式模拟时D01模拟域的时间步长为60 s，模拟时段为2007年3月27日00:00 UTC至28日00:00 UTC，文中重点分析沙尘天气过程主要出现在民勤站的时段，即27日06:00 UTC至15:00 UTC。

1.2 边界层参数化方案

本次研究选取的5种边界层参数化方案中，YSU方案[24]采用1阶闭合非局地K理论，采用相似理论计算湍流扩散系数，适合模拟强风状态下的边界层结构；MYJ、QNSE、MYNN2.5和BouLac方案均

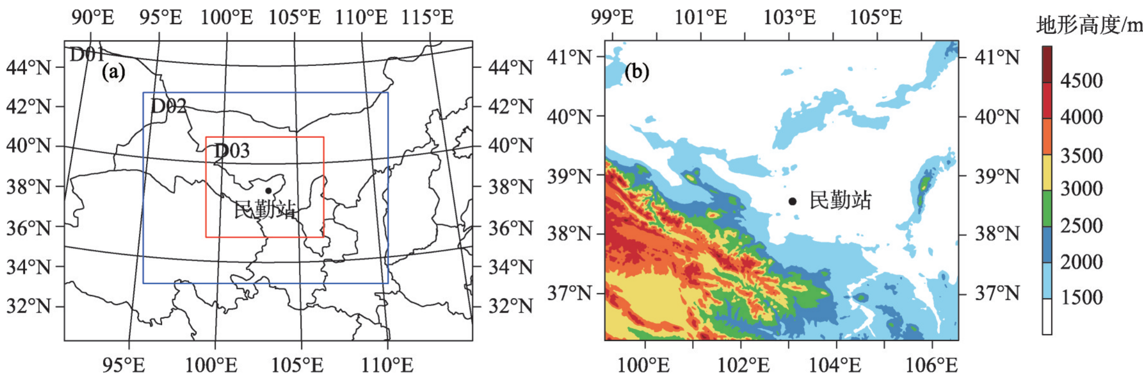


图1 以民勤站为中心的三重嵌套网格区域(a)及D03区域的地形高度(b)

Fig. 1 Regional model domains centered at Minqin(a) and spatial distribution of terrain height in D03(b)

表1 模式设置及试验设计

Tab. 1 Model configuration and experiment settings

模拟域	D01	D02	D03
模拟时段	2007年3月27日00:00 UTC–28日00:00 UTC		
模拟中心	103.08°E,38.63°N	103.08°E,38.63°N	103.08°E,38.63°N
水平分辨率	15 km	5 km	1.67 km
格点维数	151×111	271×211	391×331
垂直层数	30层	30层	30层
顶部气压	50 hPa	50 hPa	50 hPa
积分步长	60 s	20 s	6.7 s
输出时间分辨率	1 h	5 min	5 min
微物理过程	WSM5	WSM5	WSM5
短波辐射	RRTM	RRTM	RRTM
长波辐射	RRTM	RRTM	RRTM
积云参数化	Kain-Fritsch	–	–
陆面过程	Noah	Noah	Noah
边界层及近地层参数化	YSU(MM5 M-O)、MYJ(M-O)、QNSE(QNSE)、MYNN2.5(MYNN)和BouLac(MM5 M-O)		
起沙参数化	GOCART-AFWA	GOCART-AFWA	GOCART-AFWA

为1.5阶局地闭合方案,采用湍流动能TKE(Turbulent Kinetic Energy)计算湍流扩散系数和边界层顶高度,能预报局部的垂直混合强度和湍流动能。MYJ方案[25]采用Mellor-Yamada闭合模型,在稳定条件和弱不稳定条件的边界层下误差小,在对流边界层中误差较大,适合于精细边界层结构的研究;MYNN2.5方案[26]则是在原Mellor-Yamada闭合模型基础上改进的预报次网格动能方案;QNSE方案[27]采用不同的方案表征稳定和不稳定层结下的湍流扩散,适用于稳定层结中湍流切变的模拟;BouLac方案[28]适用于陡峭地形及晴空湍流强度和位置的模拟和预报。5种方案的主要特征如表2。

1.3 起沙参数化方案

本文选取的起沙参数化方案为GOCART-AFWA(Air Force Weather Agency)方案,该方案中粒径按0.2~2 μm(dust1)、2~3.6 μm(dust2)、3.6~6 μm(dust3)、6~12 μm(dust4)、12~20 μm(dust5)进行分档,垂直沙通量计算公式[29]如下:

$$F = \alpha Q E \qquad (1)$$

式中:$\alpha = 10^{0.314(\%clay)-6}$,为考虑土壤粘土比例的影响的沙尘轰击率;$E$为风蚀度指数;$Q$为跃移水平沙通量,采用如下公式计算:

$$Q = C\frac{\rho_a}{g}u_*^3\left(1+\frac{u_{*_t}}{u_*}\right)\left(1-\frac{u_{*_t}^2}{u_*^2}\right),\quad u_* \geq u_{*_t} \qquad (2)$$

式中:C为可变动的经验比例常量;ρ_a为空气密度;g为重力加速度;u_*为摩擦速度;u_{*_t}为临界摩擦速度。从该计算公式中可以看出,起沙通量与边界层

表2 边界层参数化方案主要特征

Tab. 2 Key features of five boundary layer schemes

边界层方案	闭合方法及阶数	主要特征	边界层顶
YSU[24]	非局地1阶	增加反梯度项及卷夹通量项,增加热力诱导的湍流混合、降低动力强迫的湍流混合	理查逊数(Ri),不稳定层结,Ri=0.25,稳定,Ri=0
MYJ[25]	局地1.5阶	反梯度扩散,用Mellor-Yamada闭合模型表示表面层以上的湍流	湍流动能廓线,TKE降至0.2 $m^2 \cdot s^{-2}$时高度
QNSE[27]	局地1.5阶	不稳定层结:采用引入波动项的MYJ方案湍流动能闭合方案;稳定层结:采用稳定条件下改进的湍流谱闭合模式扩散方案	湍流动能廓线,TKE降至0.01 $m^2 \cdot s^{-2}$时高度
MYNN2.5[26]	局地1.5阶	反梯度扩散,对气压相关项进行参数化处理,增加表征浮力与切变作用的一组闭合参数	湍流动能廓线,TKE降至1.0×10^{-6} $m^2 \cdot s^{-2}$时高度
BouLac[28]	局地1.5阶	能预报不同类型下垫面、湍流强度和具体位置,并持续预报湍流动能强度	湍流动能廓线,TKE降至0.005 $m^2 \cdot s^{-2}$时高度

中的摩擦速度 u_* 及其临界值密切相关,这意味着不同边界层参数化方案计算的 u_* 对起沙通量的模拟有重要影响。

由于所选方案划分的粒径范围与 PM_{10} 并不完全一致,为了得到与观测 PM_{10} 浓度对比的模拟 PM_{10} 浓度,采用线性插值的方法计算模拟 PM_{10} 浓度,计算公式如下:

$$\begin{aligned} C_{PM_{10}} &= C_{dust1} + C_{dust2} + C_{dust3} + \frac{(10-6)}{(12-6)} C_{dust4} \\ &= C_{dust1} + C_{dust2} + C_{dust3} + 0.67 C_{dust4} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:$C_{PM_{10}}$ 为 PM_{10} 浓度;C_{dust1}、C_{dust2}、C_{dust3} 和 C_{dust4} 分别为模式输出的前4档沙尘浓度。

2 观测资料及沙尘天气过程

本文将主要利用民勤站近地层观测资料来评估不同边界层参数化方案对一次沙尘天气过程的影响。民勤地处石羊河最下游,被巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠包围,是我国沙尘暴多发区之一。民勤站(103.08°E,38.63°N)位于河西走廊,海拔高度1376.5 m,其观测资料包括:采样间隔为10 s的1 m、2 m、4 m、10 m和20 m共5层的风速、温度和相对湿度,1 m、2 m和20 m共3层的风向;采样间隔为300 s的 PM_{10} 浓度、环境气压和温度。

2007年3月27—28日,中国西北地区相继出现大范围沙尘天气,民勤站监测到一次沙尘暴过程。27日06:00 UTC,河西走廊部分测站出现扬沙天气,27日08:40 UTC,民勤已出现沙尘暴,PM_{10} 浓度高达9500 $\mu g \cdot m^{-3}$,瞬时10 m风速达到8级(19.4 $m \cdot s^{-1}$),能见度不足500 m;27日12:00 UTC沙尘暴东移,河套西部地区多个测站观测到沙尘暴和强沙尘暴,随后沙尘暴强度减弱并逐渐消失(图2)。民勤地区的地形地貌、700 hPa和850 hPa短波槽的快速移动及冷锋过境是影响此次沙尘天气发生发展的重要因素。隆霄等[30]和魏倩等[31]对此次沙尘过程的天气形势及近地层要素的变化进行了细致分析,故不再赘述。

3 模拟结果分析

3.1 风场变化分析

近地层大风是起沙过程和沙尘天气发展的重要因子。分析2007年3月27日5种边界层参数化方案模拟的10 m风场发现,06:00 UTC模拟的10 m风速在民勤以西出现了风速大于12 $m \cdot s^{-1}$ 的强风区

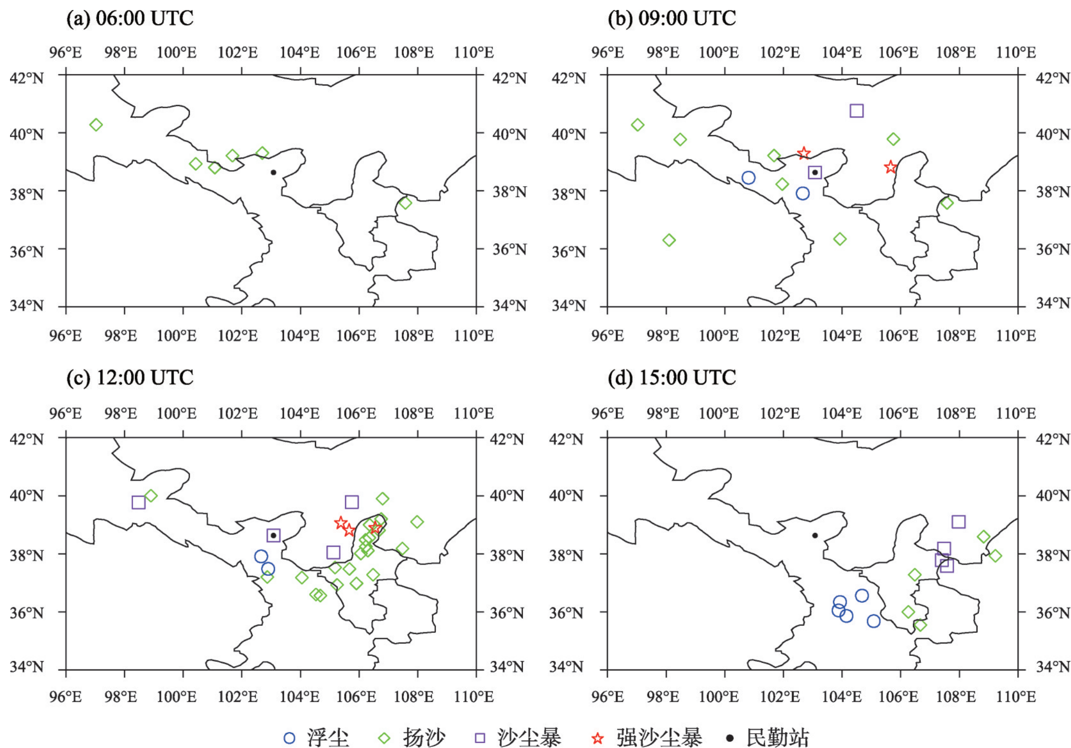


图2 2007年3月27日06:00 UTC、09:00 UTC、12:00 UTC及15:00 UTC地面监测的沙尘天气

Fig. 2 Surface observations from 06:00 UTC to 15:00 UTC on March 27, 2007 with 3 hours interval

(图略),到09:00 UTC模拟的10 m风速强风区向东扩展增强,并在民勤以北、以南及以东地区分别形成了3个强风区(A、B和C),最大风速大于16 m·s^{-1},民勤站位于强风区B内大值区附近,5种模拟结果中,YSU方案模拟的风速中心分布较为分散,MYJ和QNSE方案模拟的风速中心分布特征相似,MYNN2.5与BouLac方案模拟的强风区分布紧密,位置相似,但BouLac方案模拟的B和C合并,形成了一条东西走向的强风带(图3a)。12:00 UTC,5种方案模拟的强风区向东南方向移动,民勤已位于强风区西侧边缘,其中,YSU和BouLac方案模拟的强风区持续发展,MYJ、QNSE及MYNN2.5方案模拟的强风区则有所减弱,且MYNN2.5方案模拟的10 m风速值最低(图3b)。15:00 UTC,10 m风速大值区随沙尘区向东南移动减弱,但YSU方案和BouLac方案模拟的10 m风速明显较大(图略)。以上分析表明,BouLac方案模拟的强风区持续时间久,YSU方案次之,而MYJ、QNSE及MYNN2.5方案模拟的强风区持续时间短,并在沙尘天气发展旺盛阶段减弱,其中MYNN2.5方案的减弱程度最为明显。

此外,分析民勤站上空水平风场垂直分布的时间演变(图4)发现,5种方案均模拟出了沙尘暴发展阶段高空动量下传造成的低层风速增加,在09:00 UTC,5种方案模拟的近地层风速均达到了20 m·s^{-1},但YSU、MYJ和QNSE方案模拟的高空风速较强,风速高值区(>30 m·s^{-1})向下延伸至约3000 m,MYNN2.5和BouLac方案模拟的高空风速较弱,风速高值区(>30 m·s^{-1})仅向下延伸至4400 m左右。

3.2　摩擦速度场变化分析

GOCART-AFWA起沙参数化方案中,起沙通量的计算依赖于边界层中摩擦速度u_*的大小,因此不同边界层参数化方案计算的u_*对起沙通量及PM_{10}浓度的模拟有重要影响。分析27日5种边界层参数化方案模拟的平均摩擦速度发现,民勤站在06:00 UTC位于摩擦速度大于0.9 m·s^{-1}的高值区内,随后高值区逐渐东移扩大,到09:00 UTC,民勤及其附近地区的摩擦速度升高至1.2 m·s^{-1}以上,随后高值区逐渐减弱并移至民勤以东地区(图5),在此期间,摩擦速度高值区与沙尘区的演变有较好的对应。

为细致分析沙尘天气发生发展期间(初期:06:00—09:00 UTC,中期:09:00—12:00 UTC,后期:12:00—15:00 UTC)不同参数化方案对摩擦速度的模拟差异,将不同参数化方案模拟的摩擦速度场与5种方案模拟结果的平均场作差得到不同时刻的距平场,再做时间平均后得到不同时段的平均距平场。分析发现,YSU方案模拟的摩擦速度在沙尘天气初期低于平均值,但在沙尘天气中后期高于平均

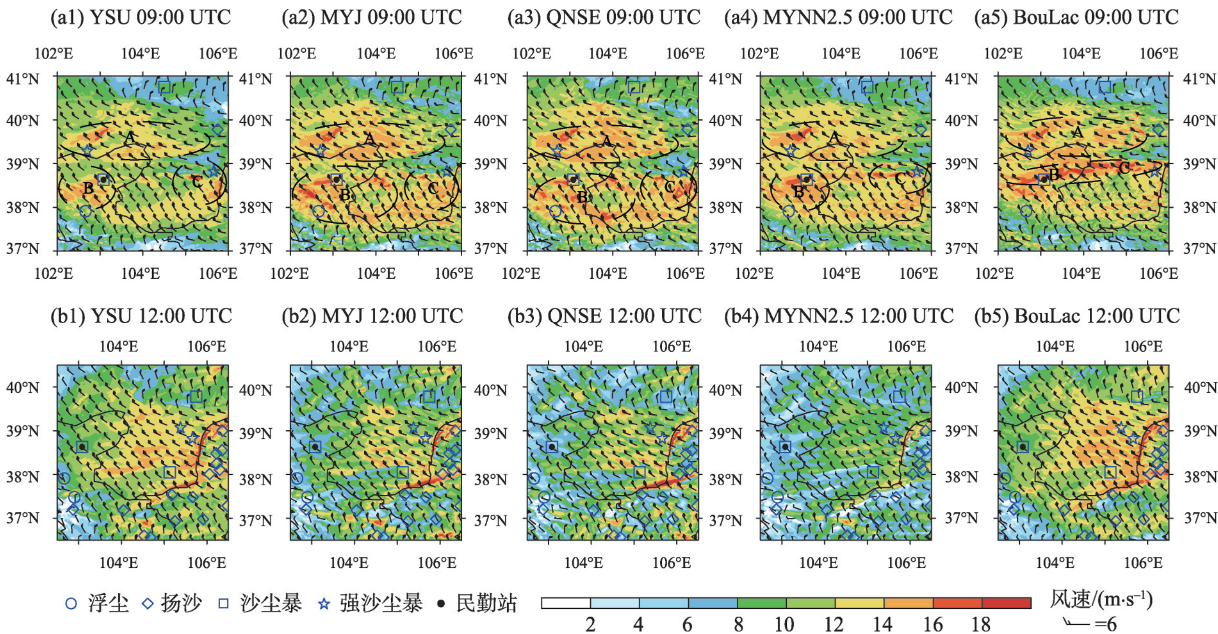


图3　2007年3月27日不同时刻D03区域内地面监测的沙尘天气及5种边界层参数化方案模拟的10 m风场

Fig. 3　Surface observations and wind fields at 10 m level simulated by different PBL schemes in D03 at different times on March 27, 2007

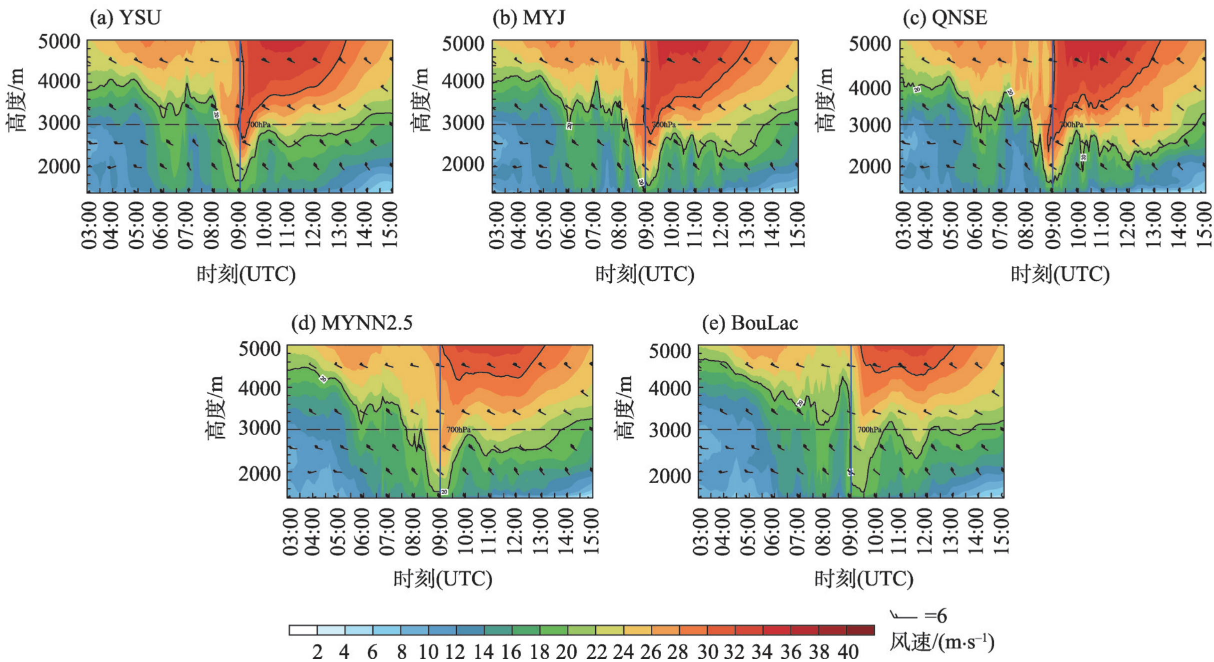


图4　2007年3月27日03:00 UTC至15:00 UTC D03区域内5种边界层参数化方案模拟的民勤站上空水平风场

Fig. 4　Vertical distribution of horizontal wind field simulated by five different PBL schemes at Minqin station in D03 from 03:00 UTC to 15:00 UTC on March 27, 2007

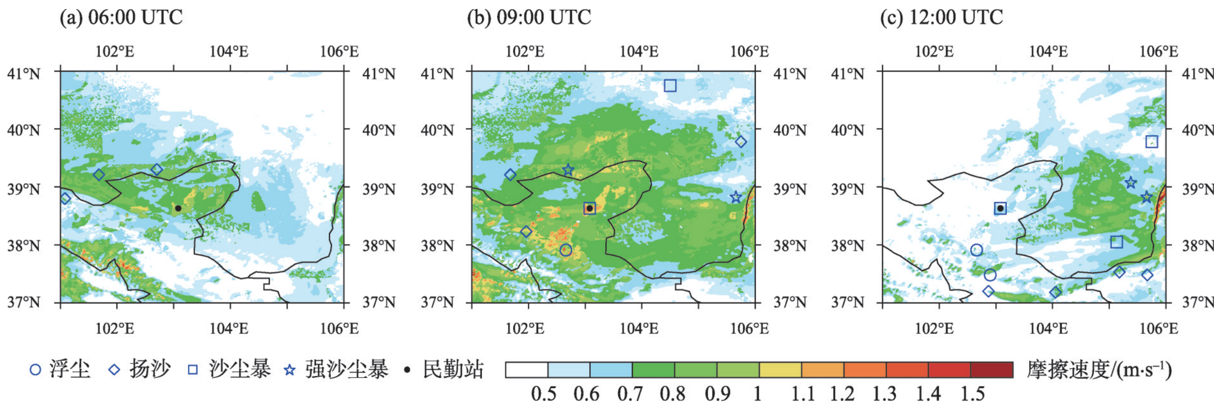


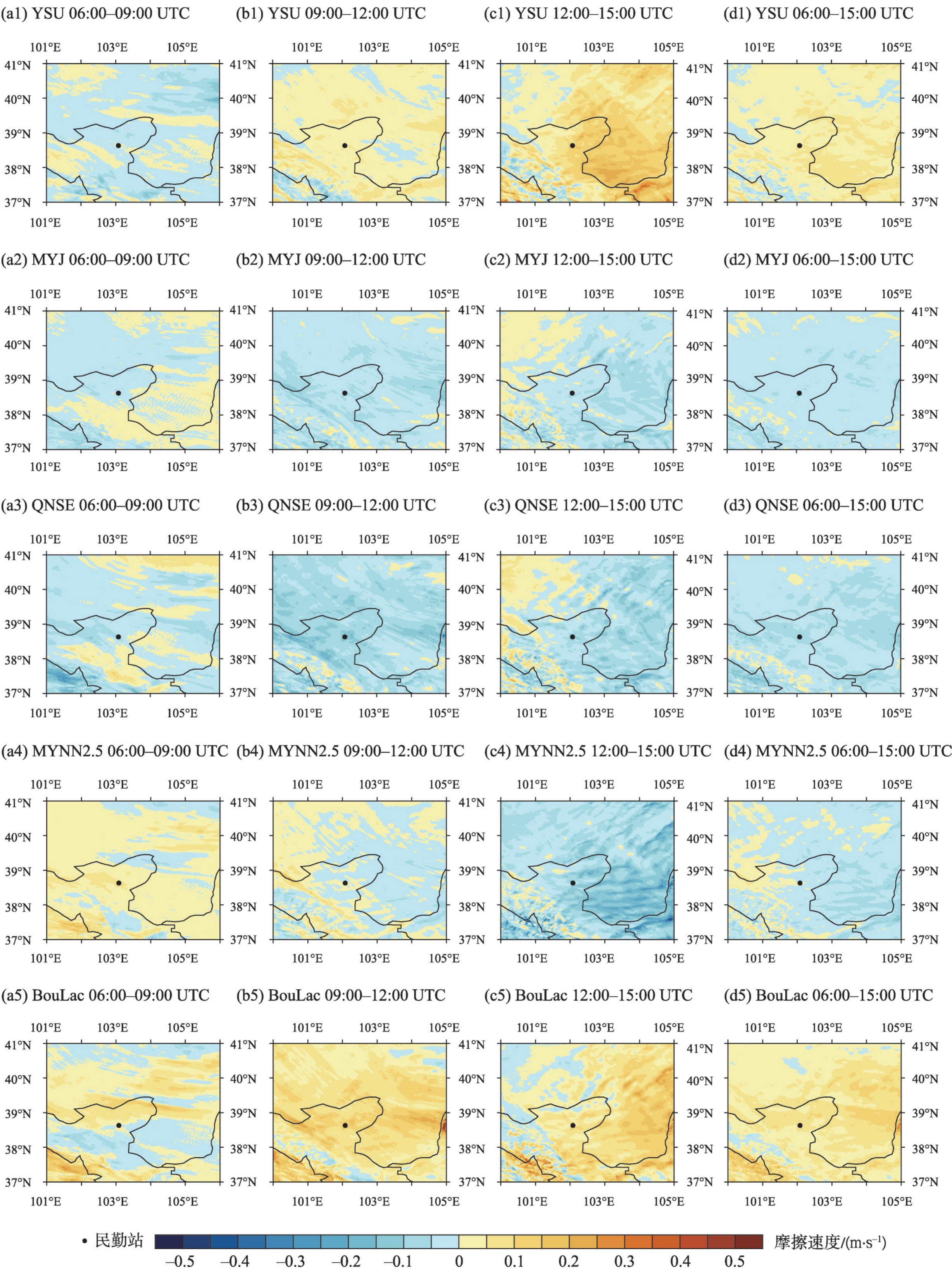
图5　2007年3月27日不同时刻D03区域内沙尘天气地面监测及5种边界层参数化方案模拟的平均摩擦速度

Fig. 5　Surface observations and average friction velocity simulated by five different PBL schemes in D03 at different times on March 27, 2007

值；MYJ和QNSE方案模拟的摩擦速度在整个沙尘期均偏低；MYNN2.5方案模拟的摩擦速度在沙尘天气初期略高于平均值，但在中、后期逐渐低于平均值；BouLac方案模拟的摩擦速度在沙尘天气初期、中期和后期均高于平均值；在沙尘天气发展期间平均而言，YSU方案和BouLac方案模拟的摩擦速度高于均值，其中BouLac方案模拟的摩擦速度明显偏高，MYJ方案、MYNN2.5方案和QNSE方案模拟的摩擦速度低于平均值（图6），以上特征均在沙尘天气后期最为明显。

3.3　2 m温湿场变化分析

温湿场的变化对沙尘天气的发展也有重要作用，午后地表的高温低湿特征能够促进起沙过程的发展，增强沙尘天气的强度。利用相同方法分析2 m温湿平均距平场发现，沙尘天气发生期间，BouLac和YSU方案模拟的2 m温度高于均值、2 m相对湿度低于均值，其中BouLac方案模拟的温度最高、相对湿度最低，且YSU方案模拟结果的高温、低湿特征与黄文彦等[6]对该方案的评估结果一致；MYJ方案、MYNN2.5方案和QNSE方案模拟的2 m温度低于均



注:(a)为3 h平均场(06:00–09:00 UTC),(b)为3 h平均场(09:00–12:00 UTC),(c)为3 h平均场(12:00–15:00 UTC),(d)为9 h平均场(06:00–15:00 UTC)。

图6　2007年3月27日D03区域内5种边界层参数化方案模拟的摩擦速度平均距平场

Fig. 6　Average differences between simulated friction velocity and average friction velocity in D03 on March 27, 2007

值、2 m相对湿度高于均值，其中QNSE方案模拟的温度最低、相对湿度最高，且5种方案的模拟特征均在沙尘天气后期最为明显（图略），这与摩擦速度模拟结果的特征一致。

3.4 PM_{10}浓度场变化分析

图7显示了2007年3月27日08:53 UTC气象卫星监测的沙尘区分布及D02区域内5种方案模拟的27日08:55 UTC PM_{10}浓度空间分布。卫星监测结果显示，民勤以北（A）及河西走廊（B）地区为沙尘区；模拟结果显示，5种方案模拟的PM_{10}浓度高值区位于沙尘区A南侧和区域C（102°E~106°E，38°N~39°N）内，沙尘区B大部分区域内模拟的PM_{10}浓度大于250 μg·m^{-3}，表明5种边界层参数化方案模拟的沙尘区分布与卫星监测结果相比有一定的合理性，但各方案模拟的沙尘区A均偏南，沙尘区B内的PM_{10}浓度相对较低，此外模拟结果在云区C还出现一个PM_{10}浓度的高值区。

对比分析不同时刻地面观测的天气现象和5种边界层参数化方案模拟的地面PM_{10}浓度可以发现，5种方案均模拟出了此次沙尘天气初生、发展及消

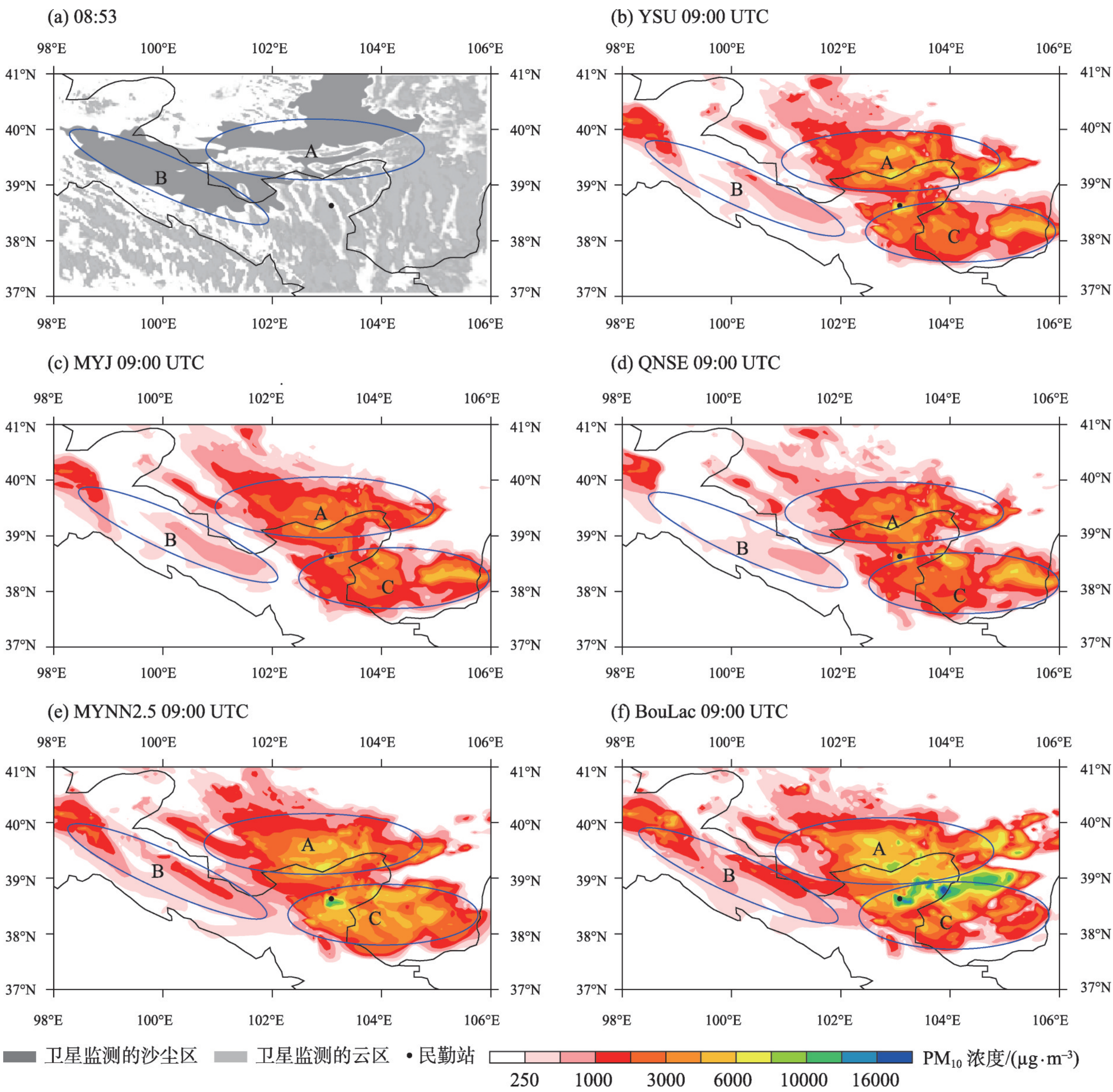


图7　2007年3月27日08:53 UTC气象卫星监测的沙尘区(a)及D02区域内08:55 UTC 5种不同边界层方案模拟的地面PM_{10}浓度(b~f)

Fig. 7　Dust and sand distribution observed by meteorological satellite at 08:53 UTC (a) and PM_{10} concentration (b-f) at surface simulated by five different PBL schemes at 08:55 UTC on March 27 2007 in D02

亡过程中PM_{10}浓度的演变。地面监测显示,27日06:00 UTC,沙尘天气开始发展,河西走廊及民勤以西部分测站出现扬沙天气(图略),到09:00 UTC,沙尘区进一步向东南扩展,民勤以北、以东共2个测站出现强沙尘暴,此时民勤沙尘暴已发展到最强时刻。与监测结果相似,5种方案模拟的PM_{10}浓度高值区均向东南方向扩展增强,并在10 m风速强风区A、B和C分别形成了3块沙尘区,其强度和分布特征与强风区基本一致(图8a)。此外,5种方案均模拟出了民勤站附近的PM_{10}浓度高值中心,其中YSU、MYNN2.5和BouLac方案模拟的PM_{10}浓度较高,且BouLac方案模拟的PM_{10}浓度最大值超过了13000 μg·m^{-3}(图8b)。进一步分析民勤站及其附近区域内沙尘粒子的三维分布(图8c)发现,BouLac方案模拟的沙尘中心(103.1°E,38.6°N)上空有较强的上升气流,沙尘柱向上延伸至4000 m高度以上,PM_{10}浓度高值区(>8000 μg·m^{-3})向上延伸至2000 m高度左右;YSU和MYNN2.5方案模拟的PM_{10}浓度高值区主要位于低层,垂直伸展高度相对较低;MYJ和QNSE方案模拟的PM_{10}浓度垂直分布特征相似,沙尘垂直伸展高度最低。12:00 UTC,沙尘天气达到最强,河套以西部分测站出现沙尘暴及强沙尘暴天气;5种方案模拟的PM_{10}浓度高值区东移至河套西部并合并增强,其中,YSU和BouLac方案模拟的强沙区(>10000 μg·m^{-3})分布范围明显较广、强度较强(图8d)。此后,地面监测的沙尘区东移减弱,5种方案模拟的PM_{10}浓度在河套地区东部降至最低,其中MYJ和QNSE方案模拟的PM_{10}浓度降幅最大,BouLac方案降幅最小(图略)。以上分析表明,YSU和BouLac方案模拟的沙尘区呈现分布范围广、持续时间久、PM_{10}浓度高的特征,特别是在沙尘天气发展旺盛时刻(约12:00 UTC),与地面监测结果有较好的一致性,其中BouLac方案模拟的沙尘区最强;MYNN2.5方案虽然在09:00 UTC模拟出了民勤的PM_{10}浓度高值区,但与其他方案相比,其在沙尘天气发展旺盛阶段模拟的PM_{10}浓度较低;MYJ方案和QNSE方案模拟的沙尘区分布范围小、持续时间短,沙尘区内PM_{10}浓度在沙尘天气发展旺盛阶段较低。此外,对比PM_{10}浓度与10 m风速的模拟结果可知,二者的变化特征有较好的一致性,PM_{10}浓度高值区总与强风区相伴,且强风区内风速越高,PM_{10}浓度越高,这表明强风区是影响强沙区形成的主要因子。

3.5 模拟和观测的民勤观测站近地层气象要素的对比分析

根据第2节的分析表明,民勤站在2007年3月27日监测到一次沙尘暴过程,图9显示了27日民勤站一些气象要素的地面观测值及5种边界层方案的模拟值,各要素观测和模拟的均值及峰值如表3所示,不同要素的平均时段不同。PM_{10}浓度和10 m风速的模拟值在沙尘暴发生之前与观测值相差较大,重点关注沙尘暴发生期间二者模拟值与观测值较为吻合的时段(07:00—12:00 UTC),各方案模拟的2 m温度和2 m相对湿度在沙尘暴发生前后较为接近且与观测值相差较小,因此重点关注二者的日变化,沙尘排放通量和地表摩擦速度的平均时段为沙尘排放通量的产生时段(03:00—12:00 UTC)。观测的10 m风速从05:30 UTC左右开始迅速上升,并在09:00 UTC左右达到峰值(15.0 m·s^{-1}),5种方案模拟的10 m风速也均在09:00 UTC左右达到峰值,但在沙尘暴前期模拟值明显较高(图9a)。2 m气温和2 m相对湿度的观测结果与5种方案的模拟结果基本一致,但14:00 UTC之后,二者的模拟值与观测值出现明显偏差,2 m气温的模拟值较观测值偏低约4 ℃,这可能是模拟时没有考虑沙尘的辐射效应所致,2 m相对湿度的模拟值逐渐高于观测值,其中YSU方案模拟的相对湿度与观测结果最为接近,QNSE方案模拟的相对湿度则较观测结果高20%(图9b, 9c)。在强风、高温和低湿特征作用下,观测的PM_{10}浓度从27日07:00 UTC左右开始激增,在08:40 UTC及09:40 UTC先后达到9647 μg·m^{-3}及8337 μg·m^{-3},随后在12:00 UTC骤降至约200 μg·m^{-3};5种方案模拟的PM_{10}浓度均在09:00 UTC左右达到峰值,且较观测结果提前约3 h开始上升,滞后约1 h降至500 μg·m^{-3}左右;此外,不同方案在沙尘暴发生期间模拟的PM_{10}浓度大小也存在差异,BouLac和MYNN2.5方案的模拟结果高于观测结果,YSU方案的模拟结果与观测结果较为接近,MYJ和QNSE方案的模拟结果低于观测结果(图9d)。

模式模拟的PM_{10}浓度大小依赖于起沙通量的模拟,起沙通量的计算又与地表摩擦速度密切相关,分析发现,5种方案模拟的沙尘排放通量和地表摩擦速度均在09:00 UTC左右达到峰值(图9e, 9f),但与MYJ和QNSE方案相比,MYNN2.5和BouLac方案模拟的沙尘排放通量和地表摩擦速度的均值和

注：(a)为09:00 UTC地面PM_{10}浓度和地面风场，(b)为放大的(a)中方框区域，(c)为沿(b)中所示直线的风场(V，W×20)和PM_{10}浓度垂直剖面，(d)为12:00 UTC地面PM_{10}浓度和地面风场

图8 2007年3月27日09:00 UTC(a, b, c)和12:00 UTC(d)D03区域内地面监测的沙尘天气及5种边界层参数化方案模拟的PM_{10}浓度及10 m风场

Fig. 8 Surface observations and PM_{10} concentrations and wind fields at 10 m level simulated by five different PBL schemes in D03 at 09:00 UTC(a, b, c) and 12:00 UTC(d) on March 27, 2007

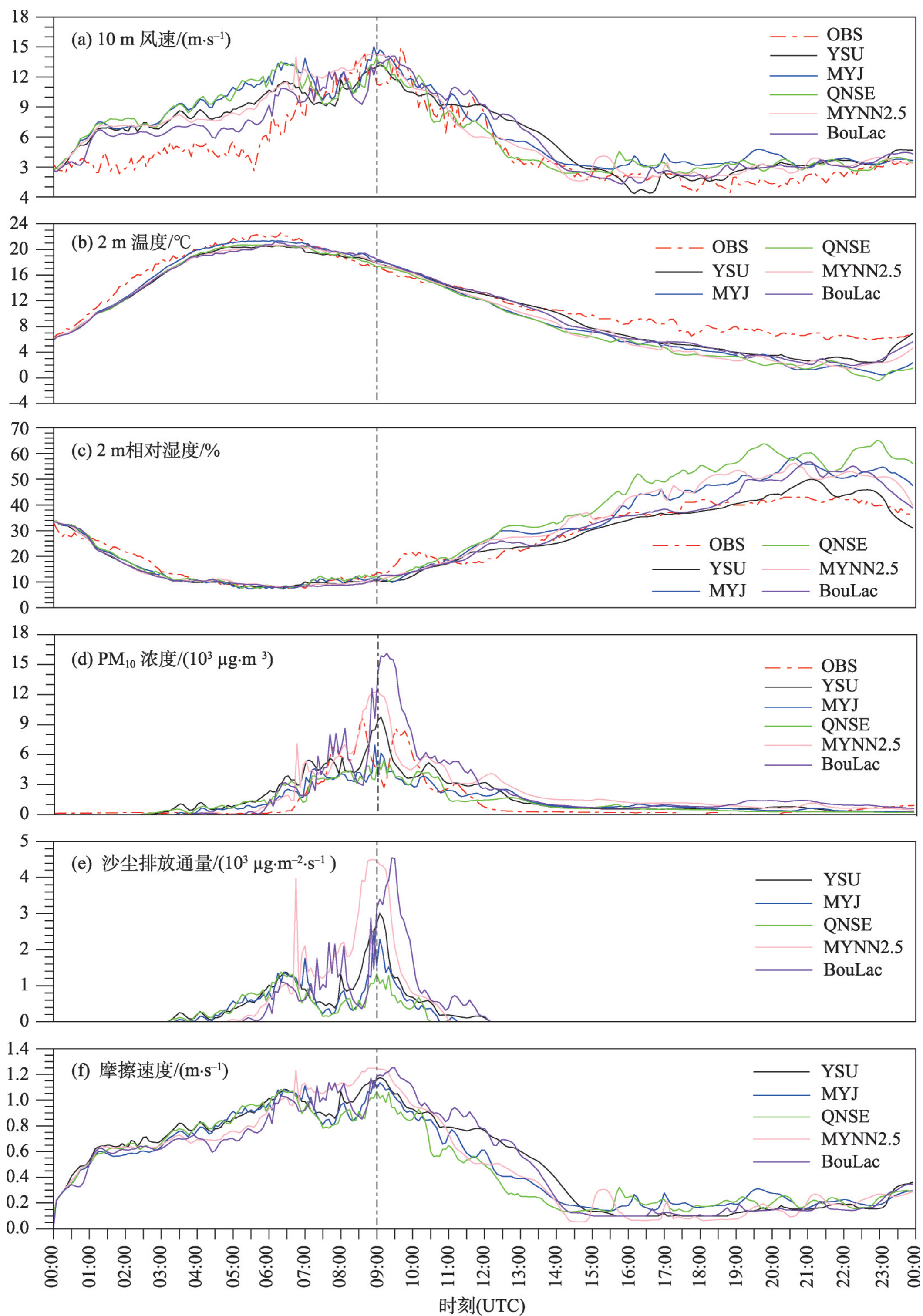


图9　2007年3月27日D03区域内民勤站10 m风速、2 m温度、2 m相对湿度和地面PM_{10}浓度的地面观测和不同边界层方案模拟结果以及不同边界层方案模拟的沙尘排放通量和摩擦速度

Fig.9　Temporal variety of simulated and observed wind speed at 10 m, temperature at 2 m, relative humidity at 2 m and PM_{10} concentration at surface, and simulated dust emission, friction velocity at Minqin station in D03 on March 28, 2007

峰值较高,YSU方案次之(表3)。综合分析各方案对地表摩擦速度、沙尘排放通量和PM_{10}浓度的模拟结果发现,3种要素呈现出一致的强度变化特征,即YSU、BouLac和MYNN2.5方案模拟的摩擦速度、沙尘排放通量和PM_{10}浓度较高,MYJ和QNSE方案的相关模拟结果最低。以上特征表明,在起沙参数化

表3 2007年3月27日不同气象要素观测及模拟的均值和峰值

Tab. 3 Different observation and simulation of the mean and peak on March 27, 2007

气象要素		平均时段	OBS	YSU	MYJ	QNSE	MYNN2.5	BouLac
10 m风速/(m·s⁻¹)	均值	07:00—12:00 UTC	10.6	10.4	11.2	10.3	11.2	11.3
	峰值	–	15	13.2	15	14	14.3	14.1
2 m温度/℃	均值	00:00—00:00 UTC	12.6	11.1	10.7	10.3	10.6	11
	峰值	–	21.8	20.5	21.4	20.7	20.7	21.2
2 m相对湿度/%	均值	00:00—00:00 UTC	26	25	29	32	29	27
	峰值	–	43	50	58	65	56	57
PM_{10}浓度/(μg·m⁻³)	均值	07:00—12:00 UTC	4503	4787	3402	3301	5944	6713
	峰值	–	9647	9658	6946	5462	12255	16129
沙尘排放通量/(μg·m⁻²·s⁻¹)	均值	03:00—12:00 UTC	–	694	540	448	1016	861
	峰值	–	–	2996	2548	1378	4497	4547
摩擦速度/(m·s⁻¹)	均值	03:00—12:00 UTC	–	0.90	0.86	0.83	0.90	0.90
	峰值	–	–	1.17	1.14	1.08	1.25	1.25

注:00:00—00:00 UTC表示27日00:00 UTC至28日00:00 UTC;OBS表示观测值。

方案相同时,不同边界层方案对摩擦速度的模拟差异影响了沙尘排放通量和PM_{10}浓度的模拟结果,较大的摩擦速度会使起沙参数化方案计算出更高的沙尘排放通量和较高的PM_{10}浓度。

为定量评估5种边界层参数化方案对民勤站近地层气象要素的模拟效果,选取相关系数(R)和均方根误差(RMSE)对模拟结果进行检验,二者的计算方法如下:

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(P_i-\bar{P}\right)\left(O_i-\bar{O}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(P_i-\bar{P}\right)^2}\times\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(O_i-\bar{O}\right)^2}} \tag{4}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(P_i-O_i\right)^2} \tag{5}$$

式中:P_i为第i时刻的模拟值;O_i为第i时刻的观测值;$\bar{P}$为模拟的平均值;$\bar{O}$为观测的平均值;N为时间序列的长度。

5种边界层参数化方案对民勤站地面PM_{10}浓度、10 m风速、2 m气温和2 m相对湿度模拟效果的统计分析结果可以看出(表4),BouLac方案模拟的10 m风速与观测值的相关系数最高、均方根误差最低,MYJ和QNSE方案模拟的10 m风速与观测值的相关系数最低、均方根误差最高。同时,5种边界层参数化方案均能较好的模拟出局地天气的日变化特征,模拟的2 m温度和2 m相对湿度与观测结果的相关系数均高达0.98。为统计分析不同方案模拟的湍流特征差异,利用2 m温度及2 m相对湿度的扰动值来探讨不同方案的模拟效果,扰动序列是由原始序列减去利用观测序列拟合出的日变化趋势得出。统计结果中,YSU方案模拟的扰动2 m温度和扰动2 m相对湿度与观测值的相关系数最高、均方根误差最低,QNSE方案的相关系数最低、均方根误差最高,此外,与模拟和观测的原始序列相关性相比,模拟和观测的扰动序列相关性大幅下降,这显然与边界层湍流过程的复杂性有关。5种方案模拟的PM_{10}浓度与观测值的相关系数则差异较小,但

表4 不同边界层参数化方案对民勤站近地层气象要素及其扰动模拟结果的统计分析

Tab. 4 Statistical analysis of near-surface meteorological elements for different PBL schemes at Minqin

边界层方案	10 m风速/(m·s⁻¹)		2 m温度(扰动2 m温度)/℃		2 m相对湿度(扰动2 m相对湿度)/%		PM_{10}浓度/(μg·m⁻³)	
	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE
YSU	0.86	2.33	0.98(0.24)	2.11	0.98(−0.13)	3.26	0.78	1386
MYJ	0.84	2.85	0.98(0.16)	2.75	0.97(−0.04)	6.57	0.80	1253
QNSE	0.79	2.79	0.98(0.13)	3.01	0.97(−0.01*)	10.44	0.81	1220
MYNN2.5	0.89	2.21	0.98(0.15)	2.69	0.98(−0.06)	6.31	0.80	1725
BouLac	0.92	1.93	0.98(0.23)	2.28	0.96(−0.06)	5.11	0.78	2157

注:R表示相关系数,RMSE表示均方根误差;*表示未通过α=0.05的显著性检验。

YSU、MYJ和QNSE方案模拟的PM_{10}浓度与观测值的均方根误差较低,MYNN2.5和BouLac方案模拟的PM_{10}浓度与观测值的均方根误差较高。

以上分析表明,就民勤站沙尘暴前后地面气象要素的模拟而言,不同方案对同一气象要素的模拟效果不同,从统计结果来看,BouLac方案对10 m风速的模拟效果最好,YSU方案对2 m温度和2 m相对湿度的模拟效果最好,QNSE方案对PM_{10}浓度的模拟效果最好。但综合分析各方案对民勤站4种地面气象要素的模拟效果发现,YSU方案对民勤站地面气象要素的模拟有一定的优势,QNSE方案对这些要素的模拟效果则相对较差。YSU方案对2 m温度及相对湿度的模拟均呈明显优势,且对10 m风速的模拟效果较好,最终模拟的PM_{10}浓度值与观测值的误差小,且在沙尘暴期间模拟的平均浓度和峰值浓度与观测最为接近(表3)。QNSE方案模拟的10 m风速、2 m温度和2 m相对湿度与观测值比相关性低、误差大,且其模拟的平均和峰值PM_{10}浓度与观测结果相差较大。

本文针对西北地区一次沙尘天气过程初步评估了不同方案模拟沙尘天气的主要特征和差异,但并未对差异产生的具体原因做过多研究。由于地表土壤的风蚀起沙过程是边界层大气与地面沙尘粒子相互作用的一种动力过程,与边界层内复杂的湍流输运过程密不可分,因此进一步深入研究不同边界层参数化方案模拟结果差异的产生原因和边界层过程对沙尘输送机制的影响可作为下一步研究方向,这对于提高沙尘天气的模拟和预报有重要意义[32]。

4 结 论

本文使用耦合化学模块的高分辨率中尺度数值模式WRF-Chem3.4,结合观测资料评估不同边界层参数化方案对一次沙尘天气过程的模拟效果,并对比分析了5种不同边界层参数化方案模拟的近地层气象要素特征的有关异同,得出以下结论:

(1) 选取5种不同边界层方案的WRF-Chem3.4模式均在中国西北地区模拟出了此次沙尘天气的初生、爆发及减弱过程,与MYJ方案、QNSE方案及MNN2.5方案相比,YSU方案和BouLac方案的模拟结果沙尘区内表现为强风速和高PM_{10}浓度的特征,且能模拟出沙尘天气发展旺盛阶段更高的2 m温度及更低的2 m湿度等特征,因此这两种方案模拟出的沙尘天气相对较强,这与地面监测结果有较好的一致性;QNSE方案模拟出较其他几种边界层参数化方案更低的10 m风速、PM_{10}浓度和2 m温度以及更高的2 m湿度。

(2) 地面风速和PM_{10}浓度的模拟结果表明,强风区是导致PM_{10}浓度高值区形成的主要因子,强风区内风速越高、PM_{10}浓度越高;地表摩擦速度、沙尘排放通量和PM_{10}浓度的模拟结果表明,摩擦速度是影响PM_{10}浓度高值区形成的重要因子,因此不同边界层方案可通过对摩擦速度的不同模拟效果影响沙尘排放通量和PM_{10}浓度,较大的摩擦速度会使起沙参数化方案计算更高的沙尘排放通量,这使YSU方案和BouLac方案模拟出较高的PM_{10}浓度。

(3) 结合民勤站观测资料进行统计分析得出,不同方案对民勤站沙尘暴前后同一地面气象要素的模拟效果不同,YSU方案对2 m温度和2 m相对湿度的模拟效果最好,BouLac方案对10 m风速的模拟效果最好,QNSE方案对PM_{10}浓度的模拟效果最好,整体而言,YSU方案对民勤站地面气象要素的模拟有一定的优势,QNSE方案对这些要素的模拟效果相对最差。

参考文献(References):

[1] 张强. 大气边界层气象学研究综述[J]. 干旱气象, 2003, 21(3): 74–78. [Zhang Qiang. Review of atmospheric boundary layer meterology[J]. Arid Meteorology, 2003, 21(3): 74–78.]

[2] Banks R F, Tiana-Alsina J, Maria Baldasano J, et al. Sensitivity of boundary- layer variables to PBL schemes in the WRF model based on surface meteorological observations, lidar, and radiosondes during the HygrA-CD campaign[J]. Atmospheric Research, 2016, 176–177: 185–201.

[3] Milovac J, Warrach- Sagi K, Behrendt A, et al. Investigation of PBL schemes combining the WRF model simulations with scanning water vapor differential absorption lidar measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(2): 624–649.

[4] Xie B, Fung J C H, Chan A, et al. Evaluation of nonlocal and local planetary boundary layer schemes in the WRF model[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117(D12103).

[5] 张碧辉, 刘树华, 马雁军, 等. MYJ和YSU方案对WRF边界层气象要素模拟的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2239–2248. [Zhang Bihui, Liu Shuhua, Ma Yanjun, et al. The effect of MYJ and YSU schemes on the simulation of boundary layer[J]. Chinese

Journal of Geophysics, 2012, 55(7): 2239–2248.]
[6] 黄文彦, 沈新勇, 王卫国, 等. 边界层参数化方案对边界层热力和动力结构特征影响的比较[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1399–1414. [Huang Wenyan, Shen Xinyong, Wang Weiguo, et al. Comparison of the thermal and dynamic structural characteristics in boundary layer with different boundary layer parameterizations [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(5): 1399–1414.]
[7] 王丽霞, 王颖, 赖锡柳, 等. WRF模式不同边界层参数化方案模拟兰州冬季边界层高度的研究[J]. 高原气象, 2017, 36(1): 162–172. [Wang Lixia, Wang Ying, Lai Xiliu, et al. Study on the simulation of boundary layer height in Lanzhou in winter using WRF model with different boundary layer parameterization schemes[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(1): 162–172.]
[8] 孟露, 赵天良, 杨兴华, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地大气边界层参数化方案的模拟评估[J]. 气象科学, 2018, 38(2): 157–166. [Meng Lu, Zhao Tianliang, Yang Xinghua, et al. An assessment of atmospheric boundary layer schemes over the Taklimakan Desert hinterland[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2018, 38(2): 157–166.]
[9] Gunwani P, Mohan M. Sensitivity of WRF model estimates to various PBL parameterizations in different climatic zones over India [J]. Atmospheric Research, 2017, 194(9): 43–65.
[10] Mohan M, Gupta M. Sensitivity of PBL parameterizations on PM_{10}, and ozone simulation using chemical transport model WRF-Chem over a sub-tropical urban airshed in India[J]. Atmospheric Environment, 2018, 185: 53–63.
[11] Banks R F, Baldasano J M. Impact of WRF model PBL schemes on air quality simulations over Catalonia, Spain[J]. Science of The Total Environment, 2016, 572: 98–113.
[12] Sathyanadh A, Prabha T V, Balaji B, et al. Evaluation of WRF PBL parameterization schemes against direct observations during a dry event over the Ganges valley[J]. Atmospheric Research, 2017, 193: 125–141.
[13] 丁成慧, 李江南, 赵杨洁, 等. 边界层参数化方案对南海秋季台风"莎莉嘉"(2016)模拟的影响[J]. 热带气象学报, 2018, 34(5): 657–673. [Ding Chenghui, Li Jiangnan, Zhao Yangjie, et al. The influence of boundary layer parameterization schemes on autumn typhoon SARIKA(2016) in south China Sea[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(5): 657–673.]
[14] 温晓培, 隆霄, 张述文, 等. 边界层参数化方案对台风SANBA初生阶段影响的数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(3): 346–357. [Wen Xiaopei , Long Xiao , Zhang Shuwen, et al. Parameterization schemes on typhoon SANBA during its initial phase[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(3): 346–357.]
[15] Liu J, Zhang F, Pu Z. Numerical simulation of the rapid intensification of hurricane Katrina(2005): Sensitivity to boundary layer parameterization schemes[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34(4): 482–496.
[16] 崔驰潇, 包云轩, 袁成松, 等. 不同边界层参数化方案对江苏地区一次平流雾过程的模拟影响[J]. 大气科学, 2018, 42(6): 1344–1362. [Cui Chixiao, Bao Yunxuan, Yuan Chengsong, et al. Influence of different boundary layer parameterization schemes on the simulation of an advection fog process in Jiangsu[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42 (6): 1344–1362.]
[17] Mylonas M P, Nastos P T, Matsangouras I T. PBL parameterization schemes sensitivity analysis on WRF modeling of a tornadic event environment in Skala Lakonia in September 2015[J]. Atmospheric Research, 2018, 208: 116–131.
[18] 高笃鸣, 李跃清, 蒋兴文, 等. WRF模式多种边界层参数化方案对四川盆地不同量级降水影响的数值试验[J]. 大气科学, 2016, 40(2): 371-389. [Gao Duming, Li Yueqing, Jiang Xingwen, et al. Influence of planetary boundary layer parameterization schemes on the prediction of rainfall with different magnitudes in the Sichuan Basin using the WRF model[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(2): 371–389.]
[19] 李斐, 邹捍, 周立波, 等. WRF模式中边界层参数化方案在藏东南复杂下垫面适用性研究[J]. 高原气象, 2017, 36(2): 340–357. [Li Fei, Zou Han, Zhou Libo, et al. Study of boundary layer parameterization schemes' applicability of WRF model over complex underlying surfaces in Southeast Tibet[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(2): 340–357.]
[20] Wang J K, Zhang B H, Zhang H D, et al. The impacts of three PBL schemes on the simulation of boundary layer meteorological factors and air pollutants in Northern China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 227(5): 98–113.
[21] 刘筱冉, 王金艳, 邱继勇, 等. 起沙方案对西北地区沙尘过程模拟的影响[J]. 环境保护科学, 2018, 44(4): 69–76. [Liu Xiaoran, Wang Jinyan, Qiu Jiyong, et al. Impact of dust emission schemes on the simulation of dust storms in the Northwest region[J]. Environmental Protection Science, 2018, 44(4): 69–76.]
[22] 黄豪杰. 基于超大尺度结构模化的沙尘暴及沙墙形态数值研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. [Huang Haojie. Numerical Studies on Sand-Dust Storms and Sand Wall Morphology Based on the Modeling of the Very-Large-Scale Motions[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.]
[23] 赵建华, 张峰, 梁芸, 等. 大气边界层湍流相干结构研究进展[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1419–1430. [Zhao Jianhua, Zhang Feng, Liang Yun, et al. Research progress on turbulent coherent structure in atmospheric boundary layer[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1419–1430.]
[24] Hong S Y. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2318–2341.
[25] Janjić Z I. The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes[J]. Monthly Weather Review, 1994, 122(5): 927–945.
[26] Nakanishi M, Niino H. An improved Mellor-Yamada Level-3 Model: Its numerical stability and application to a regional prediction

of advection fog[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 119(2): 397−407.

[27] Sukoriansky S, Galperin B, Perov V. Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 117(2): 231−257.

[28] Bougeault P, Lacarrre P. Parametrization of orography-induced turbulence in a meso-beta model[J]. Monthly Weather Review, 1989, 117: 1872−1890.

[29] Nabavi S O, Haimberger L, Samimi C. Sensitivity of WRF-chem predictions to dust source function specification in West Asia[J]. Aeolian Research, 2017, 24: 115−131.

[30] 隆霄, 赵建华, 黄建平. "07. 3"强沙尘暴天气过程的观测分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 69−74. [Long Xiao, Zhao Jianhua, Huang Jianping. Observation and analysis of '07. 3' severe sandstorm[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(1): 69−74.]

[31] 魏倩, 隆霄, 田畅, 等. 民勤一次沙尘暴天气过程的近地层气象要素多尺度特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1352−1362. [Wei Qian, Long Xiao, Tian Chang, et al. Multiscale meteorological characteristics during a sandstorm in Minqin[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1352−1362.]

[32] 魏倩. 一次沙尘天气过程发展演变的多尺度特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. [Wei Qian. Studies on Multiscale Characteristics during the Evolution of A Dust Event[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.]

Impact of boundary layer parameterization schemes on the simulation of a dust event over Northwest China

WEI Qian[1], LONG Xiao[1], ZHAO Jianhua[2], HAN Zifei[1], WANG Siyi[1]

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: In this study, WRF-Chem(version 3.4) model was used to compare the performance of different Planetary Boundary Layer (PBL) parameterization namely, the YSU(Yonsei University), MYJ(Mellor-Yamada-Janjic), QNSE(Quasi-Normal Scale Elimination), MYNN2.5(Mellor-Yamada-Nakanisfii and Niino 2.5) and BouLac PBL schemes, over the dust event in northwest china on 27 March 2007. Surface observations were used for comparisons and evaluating model performance for meteorological variables. It is shown that simulations with the five PBL schemes can successfully reproduce the evolution of the dust event. The YSU and BouLac schemes produced higher surface friction velocity, 10 m wind speed, 2 m air temperature and surface PM_{10} concentration and lower 2-mrelative humidity, thus simulating stronger weather processes than those of the MYJ, QNSE and MYNN2.5 schemes. These results indicate that different boundary layer schemes affect the dust emission flux and PM_{10} concentration through different simulation effects of friction velocity. The dust emission flux and PM_{10} concentration tend to increase with higher friction velocity. Therefore, the dust event was enhanced due to the high friction velocity and the characteristics of high temperature as well as lower humidity in near-surface layer in the afternoon. As a result, the simulated dust event with the BouLac scheme was the strongest while the weakest by the QNSE scheme. Observations from Minqin meteorological station are used to validate the simulated results over Minqin region. Statistical analysis of the five simulations shows that the QNSE scheme simulated better PM_{10} concentration, the BouLac scheme performs well for 10 m wind speed and the YSU scheme resulted in the best model performance for simulating air temperature and relative humidity at 2 m. Overall, the YSU scheme was concluded as the best PBL scheme for the dust storm and the QNSE scheme was the worst one.

Keywords: WRF-Chem; sand and dust; planetary boundary layer; numerical simulation